

6-5-2020

Ant Colony Search Skeleton Extraction MethodBased on Distance Transform

Zhaoyuan Zhang

School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

Dai Ning

School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

Liu Hao

School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

Dawei Li

School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Ant Colony Search Skeleton Extraction MethodBased on Distance Transform

Abstract

Abstract: Forsolving the poor connectivity problems of skeleton extraction method based on distance transform, *ant colony search skeleton extraction method based on distance transform is proposed*. The objects potential skeleton points are obtained according to the distance transform and its gradient. By controlling the polygon approximation error of the object boundary curve, the boundary vertices with different contribution to the object shape information are determined, and the convex vertices are taken as the endpoints of the object's skeleton line. The endpoints of redundant skeleton branches are eliminated according to the inner angle size of the endpoint. The heuristic guidance function is determined by distance transformation gradient, pixel similarity and direction of the skeleton line synthetically, the value of the path cost is proposed to evaluate the search path. The experiment results show that the method not only has good connectivity and multi-scale conditions controllability, but also reduces the redundant skeleton branches and overcomes the effects of boundary noise at the same time.

Keywords

ant colony algorithm, distance transform, gradient, polygonal approximation, skeleton extraction, skeleton pruning

Recommended Citation

Zhang Zhaoyuan, Dai Ning, Liu Hao, Li Dawei. Ant Colony Search Skeleton Extraction MethodBased on Distance Transform[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(11): 2918-2926.

基于距离变换的蚁群搜索骨架提取方法

张召远, 戴宁*, 刘浩, 李大伟

(南京航空航天大学机电学院, 江苏 南京 210016)

摘要: 针对基于距离变换的骨架提取方法连通性不足的问题, 提出了一种基于距离变换的蚁群搜索骨架提取方法。该方法根据距离变换及其梯度获得物体的潜在骨架点; 通过控制物体边界曲线的多边形逼近误差, 确定了对物体形状信息贡献程度不同的边界顶点, 并将其凸顶点作为物体的骨架线端点, 同时根据端点内角的大小排除了冗余骨架分支的端点; 将距离变换的梯度、像素间的相似性和骨架线的走向三个因素设置启发式引导函数, 并提出了用路径代价值来衡量搜索路径的优劣。实验结果证明, 该方法获得的骨架线不但具有良好的连通性和多尺度条件可控性, 而且减少了冗余骨架分支的产生, 同时还可以克服一定边界噪声的影响。

关键词: 蚁群算法; 距离变换; 梯度; 多边形逼近; 骨架提取; 骨架修剪

中图分类号: TP391.41

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2017) 11-2918-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201711043

Ant Colony Search Skeleton Extraction MethodBased on Distance Transform

Zhang Zhaoyuan, Dai Ning*, Liu Hao, Li Dawei

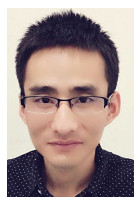
(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: For solving the poor connectivity problems of skeleton extraction method based on distance transform, *ant colony search skeleton extraction method based on distance transform is proposed*. The objects potential skeleton points are obtained according to the distance transform and its gradient. By controlling the polygon approximation error of the object boundary curve, the boundary vertices with different contribution to the object shape information are determined, and the convex vertices are taken as the endpoints of the object's skeleton line. The endpoints of redundant skeleton branches are eliminated according to the inner angle size of the endpoint. The heuristic guidance function is determined by distance transformation gradient, pixel similarity and direction of the skeleton line synthetically, the value of the path cost is proposed to evaluate the search path. The experiment results show that the method not only has good connectivity and multi-scale conditions controllability, but also reduces the redundant skeleton branches and overcomes the effects of boundary noise at the same time.

Keywords: ant colony algorithm; distance transform; gradient; polygonal approximation; skeleton extraction; skeleton pruning

引言

骨架(Skeleton)又称“中轴”(medial axis)^[1], 最



收稿日期: 2016-03-01 修回日期: 2016-07-14;
基金项目: 江苏省自然科学基金(BK20161487), 江苏省六大大才项目(GDZB-034);
作者简介: 张召远(1989-), 男, 山东枣庄, 硕士生, 研究方向医学影像处理; 戴宁(通讯作者 1978-), 男, 江苏南京, 博士, 副教授, 硕导, 研究方向为数字化设计与制造、生物医学工程。

早是由 Blum 提出的, 还分别给出了两种骨架典型定义: 烧草模型^[1]和最大球(圆)模型^[2]。骨架是表示物体拓扑结构和几何形状的一种有效形式, 并且自身的线形连通结构易于转化为树或图的形式, 为物体的表示和识别带来了方便。因此, 基于骨架的目标表示和识别技术已经广泛应用于目标识别、路径规划、行为研究和医学工程^[3]等领域。

<http://www.china-simulation.com>

• 2918 •

现有的离散域骨架提取算法主要分为三类: (1) 拓扑细化的方法^[4-5], 在保持拓扑不变性的条件下, 根据像素邻域信息设定准则, 采用迭代的方法逐步剔除边界点, 直到仅剩骨架点。此方法得到的骨架可保证连通性, 但对边界噪声非常敏感, 容易产生冗余的分支, 且骨架的位置不是准确地靠近物体的中心; (2) 基于距离变换的方法^[3,6], 通过寻找距离变换脊线来形成骨架, 该方法得到的骨架位置精确, 但难以保证骨架的连通性; (3) 基于 Voronoi 图的方法^[7], 该方法能确保得到了骨架的连通性, 但是生成的骨架需要剪枝, 且复杂度很高; 这些方法提取的结果依然不理想, 主要表现在骨架的不稳定性和骨架的连通性方面。因此, 为了解决上述问题, 希望使用一些智能优化技术来解决。

骨架修剪在骨架的处理和分析中是关键步骤, 由于骨架对边界的噪声非常敏感, 如果物体边界出现小的扰动将可能会产生冗余的骨架分支, 就可能严重改变骨架的拓扑结构, 为了提高骨架在处理、分析和识别过程中的稳定性, 有必要去除这些冗余的骨架分支。文献[7]通过对骨架分支的重建根据对整体骨架的贡献程度来去除冗余骨架分支, 该方法需要对每条分支都有进行重建比较繁琐。文献[8]在提取骨架之前通过对物体边界的平滑和填充去除边界噪声, 这种方法会改变原始物体的边界形状, 使提取的骨架偏离原始物体的骨架位置。文献[9]根据边界上的骨架点处的弯曲曲率来修剪骨架, 但是该方法并不能完全消除一些冗余的骨架分支。文献[10]通过将衡量骨架分支重要性的多种信息进行融合, 而把骨架修剪看作多目标决策问题, 提出了基于信息融合的骨架修剪方法。

蚁群算法(Ant Colony Optimization)^[11]是受自然界中蚁群觅食行为的启发而发展起来的一种利用人工蚂蚁智能搜索全局最优的仿生进化算法, 该算法通过个体之间的信息交流和相互协作找到最优解, 具有鲁棒性、并行性、离散性、正反馈性和自组织性的特点, 已成功应用于旅行商、二次分配和空间调度等^[11]组合优化问题。蚁群算法的

离散性和并行性特点非常适用于离散的数字图像, 已有许多学者将其应用到图像边缘检测、图像特征提取^[12-14]等方面。主要是根据图像的梯度或灰度的局部信息等特征作为启发信息, 引导蚂蚁搜索, 但是在搜索过程中寻优盲目性较大, 容易陷入局部解。

针对骨架的稳定性和连通性不足的问题, 本文提出了一种基于距离变换的蚁群搜索骨架提取方法, 该方法首先根据物体的距离变换及其梯度获得物体的潜在骨架点集合; 同时利用对物体边界进行多边形逼近的方法得到对物体形状信息贡献较大的骨架端点; 然后根据距离变换及其梯度信息设置启发式引导函数和信息素更新规则, 通过更新蚂蚁搜索的起始点集合与终止点集合, 使蚂蚁搜索出物体的连续骨架线。该方法能够很好的保证骨架的连通性, 消除了冗余骨架分支, 并且可以通过控制逼近误差获得对物体形状信息的贡献程度不同的骨架线端点, 实现了骨架的多尺度控制。

1 基于距离变换的骨架特征分析

1.1 距离变换及其梯度

根据骨架的最大圆(Maximal Disks)^[2]定义, 对于物体 A 内以点 q 为圆心的圆 Qq , 如果在物体内不存在以其它任意点 p 为圆心的圆 Qp , 使得 $Qq \in Qp$, 则 Qq 是物体在点 q 处的最大内切圆, 点 q 是物体的骨架点, 因此, 骨架是在物体内部到其边界距离最短的局部极大值点的集合。距离变换是计算物体内的点到边界的最短距离, 对于物体 B , ∂B 为 B 的边界, 则物体 B 的距离变换定义:

$$DT(B) = \min \{d(p, q) | p \in B, q \in \partial B\} \quad (1)$$

其中 $d(p, q)$ 表示点 p, q 间的距离, 由于距离计算方式的精度会直接影响到提取骨架点的准确性, 本文选用欧氏距离变换, 图 1(b)表示了图 1(a)中物体的距离变换。距离变换记录了每个点到边界的最短距离, 那么可以通过距离变换来分析物体的骨架。

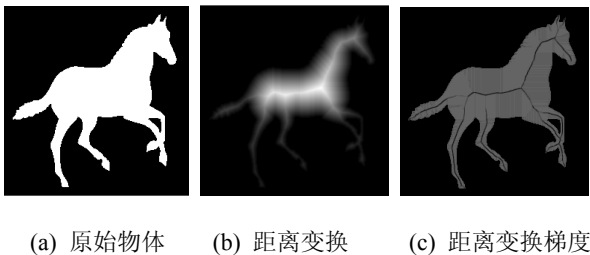


图 1 原始物体、距离变换及其梯度

Fig.1 Original object, distance transformation and gradient

骨架线的一个重要性质是位于物体的几何中心，距离变换能够直观地反映这种性质。从图 1(b) 中可以看出亮度较高的区域在物体几何中心位置处，且已经初步具备了骨架的形态，而且距离变换值在几何中心处发生突变，且关于几何中心近似对称。如果把物体每个像素点的距离变换值看作是该点在与图像垂直方向上的到图像平面的高度值，那么就可以将这些点拟合成一个曲面，则提取目标的骨架线实际上是寻找曲面的脊线。根据局部曲面类型的定义^[15]，脊线两侧的局部曲面是关于脊线近似对称。

综上所述，在物体骨架点的 8-邻域内，沿骨架线方向两侧的距离变换值近似相等，且物体的距离变换值在骨架线处发生突变。因此，在距离变换图像中骨架点处的梯度值小于该邻域内非骨架点处的梯度值。本文使用 Sobel 算子分别从 0° 、 45° 、 90° 和 135° 四个方向求距离变换的梯度，然后取其中的梯度最大值作为当前像素点的梯度，形成距离变换的梯度图，如图 1(c) 所示，可以看出在物体内部靠近几何中心处亮度较低的区域也已经初步具备了骨架的形态。

1.2 潜在骨架点

通过 1.1 节的分析可知，越靠近物体几何中心位置的点，其距离变换值越大，而且骨架点处的距离变换值比其邻域内非骨架点的距离变换值大，因此，骨架可以粗略的看作是局部距离变换值极大点的集合。对于距离变换的梯度，骨架点处的梯度值比其邻域内非骨架点的梯度值小。因此，通过如下定义确定物体的潜在骨架点：

定义： I_p 、 ΔI_p 分别是 p 处的距离变换值和其距离变换的梯度值， Q 是 p 的 8-邻域像素点的集合，如果满足 $\forall q \in Q, I_p \geq I_q \cap \Delta I_p < \Delta I_q$ ，则称 p 为物体的潜在骨架点。即选择距离变换局部极大点中具有最小梯度值的点作为物体的潜在骨架点。如图 2 所示，白色点标明了潜在骨架点的位置，可以看到这些点都落在了物体的几何中心位置上。

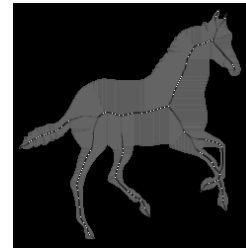


图 2 潜在骨架点

Fig.2 Potential skeleton points

2 物体骨架线端点的确定

如果一个骨架点在骨架线上只存在一个点与其相邻，则该骨架点被称为骨架端点，而物体边界所有的凸点都是该物体骨架线的端点^[16]，因此可以通过计算物体边界的凸点获得骨架端点。但由于噪声和分割错误会产生一些比较尖锐的边界点，而这些点又容易产生较大的骨架分支，造成骨架信息冗余。因此，本文通过多边形逼近^[17]的方法确定对物体形状信息贡献较大的骨架端点，消除冗余骨架分支。

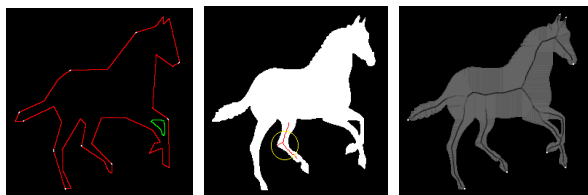
多边形逼近的基本原理是：首先在轮廓上选择两个距离最远的点，将这两个点连成线段，然后再查找轮廓上到线段距离最远的点，添加到逼近后的新轮廓。算法反复迭代，不断将最远的点添加到结果中，直到所有的点到多边形的最短距离小于指定的逼近误差。假设 C_i 是轮廓 C 上的第 i 点， P 是对轮廓 C 的多边形逼近，则多边形 P 对轮廓 C 的逼近误差 d_0 满足如下公式

$$d_0 = \max \{d_{\min}(C_i, P) | i = 1, 2, \dots, K\} \quad (2)$$

其中， $d_{\min}(C_i, P)$ 表示轮廓 C 上的点 C_i 到多边形 P 的最短距离， K 是轮廓 C 上点的个数。

根据多边形逼近原理, 近似多边形的顶点都是物体边界上的顶点, 如果用近似多边形来表示物体的边界, 那么这些点要比物体边界上的非近似多边形的顶点对物体的形状信息贡献大。逼近误差越大, 近似多边形对物体边界的逼近程度就越低, 而近似多边形上的顶点对物体的形状信息贡献就越大。通过控制多边形的逼近误差, 可以获得逼近物体边界不同程度的近似多边形, 其凸点对应的骨架分支对物体的整个骨架形态贡献程度也就不同。因此, 可以通过控制多边形逼近误差得到物体的不同尺度骨架线的端点。

对于含有细长弯曲部分的物体, 虽然通过多边形逼近保留了对物体形状信息贡献较大的骨架端点, 但仍然会在该部分存在一些端点对应的骨架分支影响物体整个骨架形态, 如图 3(a) 是保留了马的耳朵处的端点的边界近似多边形, 图中的一些端点(白色)对应的骨架分支影响马的整体骨架形状识别, 如图 3(b) 中的黄色圆圈标记是在马的腿部端点对应的骨架分支, 这种骨架会严重改变了骨架的拓扑结构, 造成骨架信息的冗余, 需要对其进行修剪。本文通过控制端点内角 θ 的大小来消除这种冗余骨架分支的端点, 在骨架提取中避免了冗余骨架分支的产生, 实现了骨架修剪。如图 3(c) 白色顶点所示, 这些顶点对应的骨架能够完整表示出物体的整个骨架拓扑结构。



(a) 近似多边形 (b) 骨架线冗余分支 (c) 骨架端点

图 3 近似多边形、骨架的冗余分支和骨架端点

Fig.3 Approximate polygons, redundant branches of skeleton and skeleton endpoints

3 基于蚁群搜索算法的骨架提取

3.1 蚁群算法的基本原理

蚂蚁在寻找食物时, 会在其走过的路径上释放

一种化学物质—信息素, 该信息素含有其所经过路径的环境状态信息, 而且会随着时间的延续不断挥发, 经过存有此信息素状态的路径的其它蚂蚁能够感知这种信息素的存在及其强度, 并以此来引导自己以最大概率选择信息素强度高的方向运动; 经过蚂蚁越多的路径其信息素就越强, 后继蚂蚁选择该路径的概率就越大, 这样便形成了一个正反馈机制。

根据蚁群系统的基本原理^[18]: 蚂蚁搜索的下一像素点是在其当前像素点的 8-邻域内随机选择, 在第 $n(n=1,2,\dots,N)$ 次循环中, 蚂蚁 $m(m=1,2,\dots,M)$ 从像素点 i 移动到像素点 $j(i \xrightarrow{m} j)$ 的转移规则为:

$$s = \begin{cases} \arg \left\{ \max_{j \in \Omega_i} \left((\tau_{ij}^n)^\alpha (\eta_{ij})^\beta \right) \right\} & q \leq q_0 \\ S & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

其中, Ω_i 表示像素点 i 的 8-邻域, τ_{ij}^n 表示第 n 次循环像素点 $i \rightarrow j$ 间的信息素, η_{ij} 表示像素点 $i \rightarrow j$ 间的启发信息, α 和 β 分别为信息素因子和启发信息因子。 q 是在 $[0,1]$ 区间均匀分布的随机数, q_0 是一个参数 ($0 \leq q_0 \leq 1$)。 S 是根据下面的状态转移概率分布选出的一个随机变量。

$$P_{ij}^n = \begin{cases} \frac{(\tau_{ij}^n)^\alpha (\eta_{ij})^\beta}{\sum_{l \in \Omega_i} (\tau_{il}^n)^\alpha (\eta_{il})^\beta} & j \in \Omega_i \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

在建立路径的过程中, 蚂蚁应用公式(5)的局部更新规则对它们所经过的路径进行信息素更新

$$\tau_{ij}^n = (1 - \rho_1) * \tau_{ij}^{(n-1)} + \rho_1 * \Delta \tau_{ij}^m \quad (5)$$

其中, $\Delta \tau_{ij}^m$ 表示当前搜索中蚂蚁 m 在像素点 $i \rightarrow j$ 上释放的信息素, ρ_1 表示信息素的挥发速率。

一旦所有蚂蚁都完成了它们的路径搜索, 应用公式(6)的全局更新规则再次对路径上的信息素进行修改

$$\tau_{ij}^n = (1 - \rho_2) * \tau_{ij}^{(n-1)} + \rho_2 * \Delta \tau_{ij} \quad (6)$$

其中, $\Delta \tau_{ij}$ 表示到当前迭代为止最优路径像素点 $i \rightarrow j$ 上释放的信息素, ρ_2 表示信息素的挥发速率。

3.2 初始搜索点和终止搜索点集的选择

潜在骨架点集合与骨架端点集合构成了蚂蚁搜索的初始骨架点集合, 蚂蚁搜索的初始点是初始骨架点集中的距离变换值最大的点, 终止搜索点集为物体的边界点集, 如果终止搜索点是骨架端点则搜索成功, 否则搜索失败, 蚂蚁会在初始点和骨架端点之间搜索出一条骨架分支。然后对初始骨架点集合和终止点集合进行更新, 检查如果存在初始骨架点没有被搜索为骨架点, 则可能存在骨架分支缺失现象。重新设置蚂蚁搜索的初始点和终止搜索点集合, 即删除初始骨架点集中已经是骨架线上的点, 然后再以初始骨架点集中的距离变换值最大的点为起始搜索点, 终止搜索点集为骨架点集和物体的边界点集, 如果终止搜索点全是骨架点则搜索成功, 否则搜索失败。蚂蚁搜索的初始点和终止点集合的选择步骤如下:

$$\begin{aligned} & \text{While}(S_{\text{initial}} \in \emptyset) \\ & \{ \\ & \quad P_{\text{initial}} = \text{Max}(S_{\text{initial}}); \\ & \quad S_{\text{stop}} = S_{\text{edge}} \cup S_{\text{SkI}}; \\ & \quad S_{\text{SkI}} = \text{Search}(P_{\text{initial}}, S_{\text{stop}}); \\ & \quad S_{\text{initial}} = S_{\text{initial}} - (S_{\text{initial}} \cap S_{\text{SkI}}); \\ & \} \end{aligned}$$

其中, P_{initial} 为初始搜索点, S_{stop} 为终止搜索点的集合, S_{initial} 为初始骨架点的集合, S_{SkI} 为骨架点的集合, S_{edge} 为物体边界点的集合。

3.3 启发式引导函数的设置

在距离变换图中, 物体的骨架线就是距离变换值发生突变的地方, 这些地方的梯度值最小, 因此梯度值是反映目标骨架线的重要指标。物体的骨架线是有一定走向的, 这种走向对蚂蚁搜索路径具有指导作用, 因此, 根据蚂蚁上一步的行走方向, 引入了一个方向系数 $w(\phi)$, ϕ 表示蚂蚁运动方向的改变量, 由于蚂蚁只能在当前点的 8-邻域内进行搜索, 则 $\phi \in \{0, \pi/4, \pi/2, 3\pi/4, \pi\}$, 方向系数 $w(\phi)$ 对应的取值为 $\{1, 2/3, 1/4, 1/12, 0\}$, 即与原运动方向越

一致的点, 其方向系数取值越大。图 4 所示为蚂蚁上一步的行走方向沿箭头所指的方向时各点的方向系数取值情况。

2/3	1	2/3
1/4	Ant ↑	1/4
1/12	0	1/12

图 4 蚂蚁行走方向系数取值情况

Fig.4 The value of the ant walking direction coefficient

根据骨架线局部特征分析, 在骨架点的 8-邻域内, 如果一个像素点处的距离变换值与骨架点处的距离变换值之间的差值越小, 则此像素点为骨架点的可能性就越大; 而且骨架点处的距离变换值比其邻域内非骨架点的距离变换值大, 如果一个像素点的距离变换值与其 8-邻域像素点的距离变换值之差的和越大则此像素点为骨架点的可能性就越大。因此, 本文通过公式(7)来计算当前像素点和下一像素点之间的相似性。

$$U_{ij} = \min \left\{ 1, \left| \frac{I_i - I_j}{V_j} \right| \right\} \quad (7)$$

其中, I_i , I_j 分别为像素点 i , j 处的距离变换值, V_j 是通过公式(8)求出的像素点 j 与其 8-邻域像素点的邻域差。

$$V_j = \frac{\sum_{l \in \Omega_j^m} (I_j - I_l)}{8} \quad (8)$$

蚂蚁从当前像素点到下一像素点的启发信息与该点的梯度值、蚂蚁运动方向的连续性和两点之间的相似性相关。因此, 本文通过下式来设置蚂蚁运动的启发式引导信息, 使蚂蚁更加倾向于沿着真实的骨架线方向行走。

$$\eta_{ij} = w_{ij}(\phi) \left[\alpha_1(1 - \Delta I_j) + \alpha_2(1 - U_{ij}) \right] \quad (9)$$

其中, ΔI_j 为归一化后的像素点 j 处的梯度值, α_1, α_2 为常数且 $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$ 。

3.4 信息素的更新策略

本文采用信息素的局部更新和全局更新相结合的方式, 实现蚁群算法的正反馈作用, 同时为了防止早熟收敛行为, 引入了信息素的最大值和最小值的限制, 即 $\tau_{\min} \leq \tau \leq \tau_{\max}$ 。

蚂蚁根据转移规则在当前像素点选择下一个像素点, 并保留其路径, 直到终止搜索点。当所有蚂蚁都完成路径搜索后, 只对搜索成功的路径进行信息素的局部更新, 提高了蚂蚁的搜索速度。为了使信息素对物体的骨架线具有指示作用, 使蚂蚁在启发信息强度较大的像素点处释放较多的信息素, 通过公式(5)进行信息素局部更新, 其中 $\Delta\tau_{ij}^m$ 为:

$$\Delta\tau_{ij}^m = \begin{cases} \eta_{ij} & i \xrightarrow{m} j \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (10)$$

由于搜索终止点有多个, 每当完成一次循环搜索后, 根据搜索成功路径的终止点位置进行路径分组, 每组都代表了目标骨架线的一条分支。通过对骨架特征的分析, 发现骨架点上的梯度值比其邻域内的非骨架点的梯度值要小, 因此, 根据公式(11)计算每组中的路径代价 C_R , 代价值越大的路径, 就越靠近真实的骨架线, 则该路径就是在本次循环中该组的最优路径。

$$C_R = \frac{\sum_{i \in R} (1 - \Delta I_i)}{L_R} \quad (11)$$

其中, ΔI_i 为归一化后的像素点 i 处的梯度值, L_R 为路径 R 的长度, 即路径 R 上所包含的像素点。

为了使蚂蚁下次搜索主要集中在当前循环为止每组所找出的最好路径的领域内, 越靠近真实的骨架线的路径释放较多的信息素, 根据公式(6)对当前循环为止蚂蚁搜索的每组最优路径 R_{best} 上的信息素进行全局更新, 其中 $\Delta\tau_{ij}$ 为:

$$\Delta\tau_{ij} = \begin{cases} C_{R_{best}} & i, j \in R_{best} \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (12)$$

3.5 蚁群搜索算法流程

本文提出的基于改进蚁群搜索算法的骨架提取算法的具体流程如下图 5 所示, 图 6 是以图 1(a)

中的物体为例显示算法执行的结果。

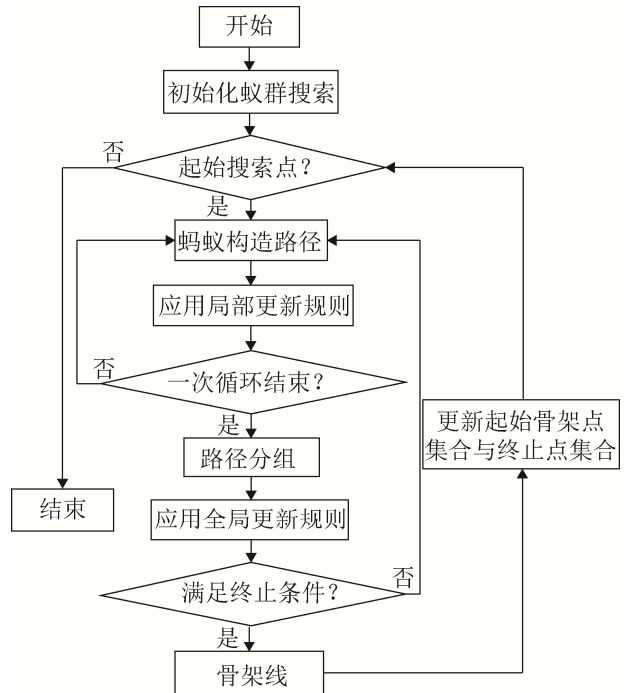


图 5 蚁群搜索骨架提取算法流程图

Fig.5 The flow chart of ant colony search skeleton algorithm

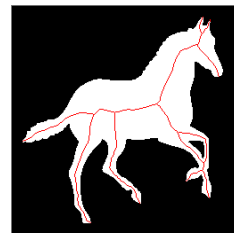


图 6 图 1(a)中物体的骨架

Fig.6 The skeleton of the object in figure 1(a)

4 实验结果与分析

为了验证、比较算法的效果, 我们将本文的算法应用于大量的实验, 选取了 MPEG-7 CE Shape-1 Part B 中部分有代表性的二值图像。实验过程中的一些参数的取值为: $\alpha=1$ 、 $\beta=2$ 、 $\tau_{\min}=0.03$ 、 $\tau_{\max}=0.8$ 、 $\rho_1=0.7$ 、 $\rho_2=0.6$, 其它参数根据具体情况进行设置。

4.1 骨架的多尺度控制变化分析

在多边形逼近的过程中, 通过控制逼近误差得到了逼近物体边界不同程度的近似多边形, 以其凸点为骨架线端点就可以得到物体的不同尺度的骨

架线端点, 经过蚁群搜索出物体的多尺度骨架, 如图7所示。为了避免噪声影响, 选择逼近误差 $d_0=0.0023$, 枫叶的所有明显突起部分的凸点对应的骨架分支能够完全表达出整个枫叶的拓扑结构, 如图(a)所示。如果枫叶轮廓上的凸点到逼近多边形的最短距离小于给定的逼近误差, 则该点就不是骨架线的端点, 其对应的骨架分支便会被去除, 如图(b)、(c)、(d)所示, 随着逼近误差的增大, 一些突起比较小的部分的凸点对应的骨架分支不断被去除。从图7可知, 逼近误差 d_0 越大, 骨架越粗糙, 否则, 骨架越精细, 骨架的多尺度控制可以实现物体由粗到精不同程度的表示和匹配。

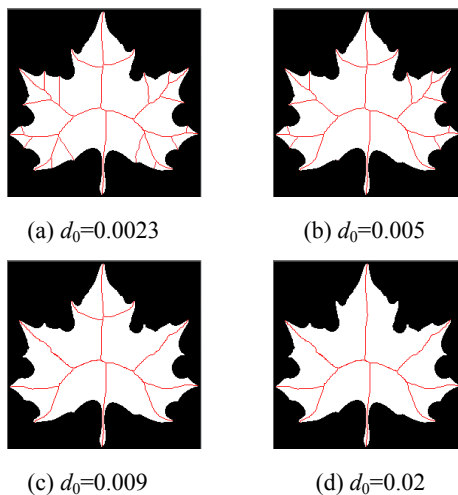


图7 多边形逼近对骨架的多尺度控制

Fig.7 Multi-scale control of skeleton polygon approximation

4.2 骨架的修剪

通过控制多边形逼近的误差可以得到物体的多尺度骨架线, 但是在一定尺度下的骨架线, 可能会存在影响物体识别的冗余骨架分支, 需要对骨架线进行修剪, 如图8所示。(a)图为在 $d_0=0.005$ 尺度下的该物体骨架线, 黄色圆圈内的骨架影响了对整个鸟的形态识别, 可以通过控制其凸点内角 θ 的大小来去除这些多余的骨架分支端点, 实现骨架线的修剪, (b)图为(a)图在该尺度下 $\theta < 90$ 对物体的骨架线冗余分支的修剪。(c)图为在 $d_0=0.004$ 尺度下的物体骨架线, 显然有很多骨架分支, (d)图为

通过使 $\theta < 100$, 得到的骨架更能代表物体的形状。

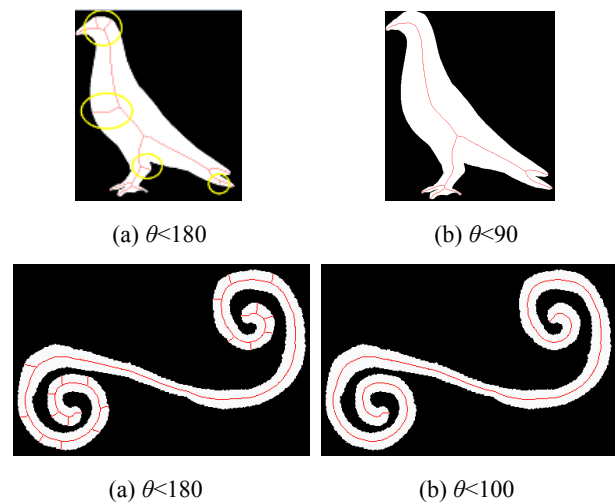


图8 凸点内角的大小对骨架的影响

Fig.8 The effect of the interior angle of the convex points on the skeleton

4.3 骨架的可识别性对比分析

骨架的可识别性对物体的识别是非常重要的, 物体骨架线的丢失或冗余都会改变物体的拓扑关系。图9比较了文献[8]和[9]中的方法与本文的方法在提取物体的骨架时出现了骨架分支的冗余或缺失的情况, 文献[8]通过对马的边界进行平滑, 在保留了马耳朵处的特征时, 并不能完全消除马颈处的突出特征如图(a)所示, 这样就会在马颈处产生冗余骨架分支(黄色圆圈内), 文献[9]根据骨架点处的曲率来修剪骨架, 为了避免冗余骨架的产生却会在马的耳朵处出现骨架丢失, 如图(b)所示(黄色圆圈内), 图(c)是本文方法在 $d_0=0.027$ 尺度下保留了耳朵处骨架分支, 然后使 $\theta < 70$ 去除了冗余的骨架分支。

4.4 边界噪声

本文利用距离变换的邻域信息及其梯度来设置蚂蚁搜索的启发式引导函数, 以及蚁群算法的正反馈机制特性, 在一定程度上克服了边界噪声对骨架的影响。图10比较了加入噪声前后骨架结构的变化, 可以发现, 骨架在拓扑结构上没有发生变化, 仅在形状上有细微的差别。

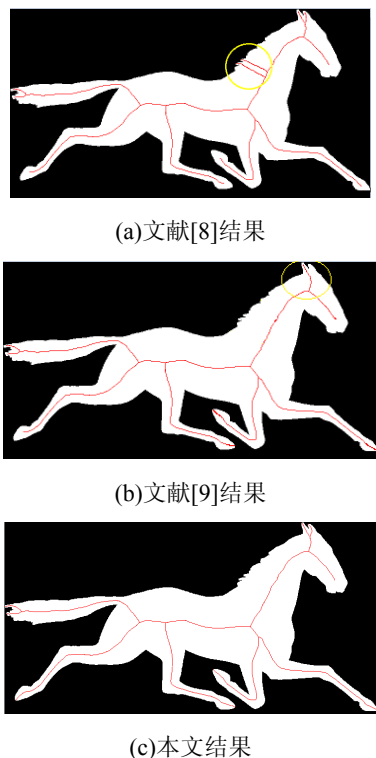


图 9 本文结果和文献[8-9]结果比较
Fig.9 The results in this paper compared with the results in [8-9]

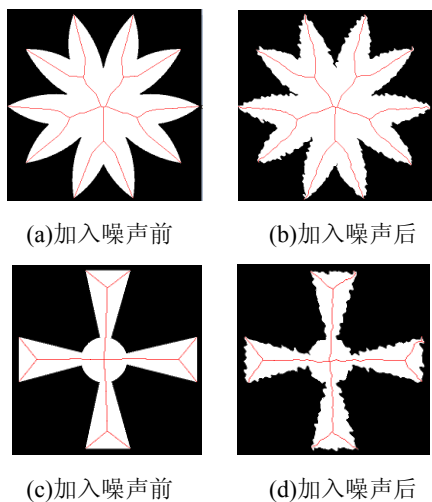


图 10 加入噪声前后效果对比图
Fig.10 The effect comparison diagram before and after joining the noise

4.5 时间复杂度分析

假设图像大小为 $m \times n$, 距离变换算法的时间复杂度为 $O(m \times n)$, 对距离变换求梯度的时间复杂度为 $O(k^2 \times N)$ (其中, k 是本文 Sobel 算子的大小, N 是物体所包含的像素个数), 对物体边界进行多

边形逼近的方法时间复杂度不会超过 $O(N)$, 使用蚁群算法搜索出完整骨架的时间复杂度为 $O(N_c \times N^2 \times M)$ (其中 N_c 是循环次数, M 是蚂蚁数量), 因此, 本文算法的时间消耗主要在蚁群搜索骨架线的过程中。虽然蚁群算法在时间复杂度上可能不如传统的算法, 但是蚁群算法的正反馈特性能很快的发现较好的解, 在一定程度上克服了边界噪声对骨架的影响, 而且其并行性可以实现并行运算。

为了说明算法的稳定性, 我们对不同形状的物体进行骨架提取, 如图 11 所示, 通过设置参数 d_0 获得该尺度下的凸点, 然后通过凸点内角 θ 的取值消除了冗余骨架分支的端点, 最后经过蚁群搜索出物体的骨架线。从图中可以看到, 本文方法得到的骨架有较好的连通性, 并能较好的表示物体的形态特征。

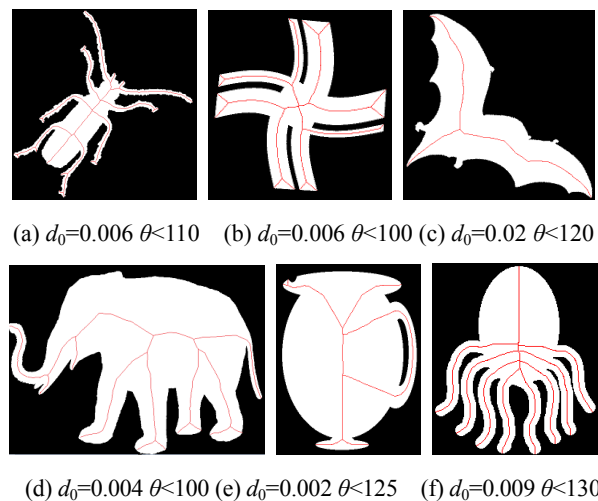


图 11 一些二维物体骨架线
Fig.11 The skeleton of some two-dimensional objects

5 结论

本文根据物体的距离变换及其梯度获得物体的潜在骨架点集合; 同时利用对物体边界进行多边逼近的方法, 通过控制逼近误差得到了对物体的形状信息贡献程度不同的骨架线的端点, 实现了多尺度骨架控制, 而且根据端点内角的大小排除了对物体整体骨架形状影响较小的端点, 消除了冗余骨架

分支的产生;然后根据距离变换图的梯度、像素间的相似性和骨架线的走向三个因素设置启发式引导函数,提出了衡量搜索路径优劣的标准,采用了局部更新和全局更新相结合的信息素更新规则,使蚂蚁比较快的搜索出物体的连续骨架线,通过更新蚂蚁的初始搜索点集合与终止点集合,使该方法能够搜索出物体的整体骨架线。该方法不但保证了骨架的连通性,而且还实现多尺度骨架提取,减少了冗余骨架分支的产生,算法的抗噪能力和稳定性也比较好,可广泛用于物体识别和检索等领域。蚁群算法的主要特点是正反馈和并行性,正反馈能使该方法很快的发现较好的解,并行性使得该方法易于实现并行计算,使用并行运算将是本文今后的研究重点。

参考文献:

- [1] Blum H. A Transformation for Extracting New Descriptors of Shape[M]. Boston: MIT Press, 1967: 362-380.
- [2] Blum H. Biological Shape and Visual Science(part I)[J]. Journal of Theoretical Biology(S0022-5193), 1973, 38(2): 205-287.
- [3] Liu Wenping, Jiang Hongbo, Bai Xiang, et al. Distance Transform-based Skeleton Extraction and Its Application in Sensor Networks[J]. IEEE Transactions On Parallel And Distributed Systems(S1045-9219), 2013, 24(9): 1763-1772.
- [4] 韩建峰, 宋丽丽. 改进的字符图像细化算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2013, 25(1): 62-66.
Han Jianfeng, Song Lili. An Improved Thinning Algorithm for Character Image[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2013, 25(1): 62-66.
- [5] 卞维新, 徐德琴. 指纹图像细化的复合式算法[J]. 中国图像图形学报, 2011, 16(6): 1015-1021.
Bian Weixin, Xu Deqin. Composite thinning algorithm for fingerprint image[J]. Journal of Image and Graphics, 2011, 16(6): 1015-1021.
- [6] 杨晨晖, 刘聪. 优化的梯度最短路径骨架提取算法[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2014, 52(2): 201-205.
Yang Chenhui, Liu cong. Skeleton extraction algorithm of optimized gradient path[J]. Journal of Xiamen University (Natural Science), 2014, 52(2): 201-205.
- [7] Liu Hongzhi, Wu Zhonghai, D. Frank Hsu, et al. On the generation and pruning of skeletons using generalized Voronoidiagrams[J]. Pattern Recognition Letters (S0167-8655), 2012, 33(16): 2113-2119.
- [8] AlexandruTelea. Feature preserving smoothing of shapes using saliency skeletons[C].Visualization in Medicine and Life Sciences II,Heidelberg: Springer,2012: 155-172.
- [9] Wei Shen, Xiang Bai, Rong Hu, et al. Skeleton growing and pruning with bending potential ratio[J]. Pattern Recognition(S0167-8655), 2011, 44(2): 196-209.
- [10] Liu Hongzhi, Wu Zhonghai, Zhang Xiang, et al. A skeleton pruning algorithm based on information fusion[J]. Pattern Recognition Letters(S0167-8665), 2013, 34(10): 1138-1145.
- [11] Dorigo M, Maniezzo V, Colomi A. The ant system: optimization by a colony of cooperating agents[J]. IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics-Part B (S0018-9472), 1996, 26(1): 29-41.
- [12] Biniarz A, Abbasi A. Segmentation and Edge Detection Based on Modified ant Colony Optimization for Iris Image Processing[J]. Journal of Artificial Intelligence and Soft Computing Research(IS2083-2567), 2015, 3(2): 133-141.
- [13] AA Asha, SP Victor, ALourdusamy. Feature Extraction in Medical Image using Ant Colony Optimization: A Study[J]. International Journal on Computer Science and Engineering(S0267-6192), 2011, 3(2): 714-721.
- [14] Liu Xiaochen, Fang Suping. A Convenient and Robust Edge Detection Method Based on Ant Colony Optimization[J]. Optics Communications(S0030-4018), 2015, 353(15): 147-157.
- [15] Besl P J, Jain R C. Segmentation through variable-order surface fitting[J]. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence(S0162-8828), 1988, 10(2): 167-192.
- [16] Jenhui Chuang, Chihao Tsai, MinchiKo. Skeletonization of three-dimensional object using generalized potential field[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence(S0162-8828), 2000, 22(11): 1241-1251.
- [17] Douglas D, Peucker T. Algorithms for the reduction of the number of points required for represent a digitized line or its caricature[J]. Canadian Cartographer (S0008-3127), 1973, 10: 112-122.
- [18] Dorigo M, Birattari M, Stutzle T. Ant colony optimization [J]. IEEE Computational Intelligence Magazine (S1556-603X), 2006, 1(4): 28-39.